

УДК 552.3(571.5)

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ПЛЮМ-ЛИТОСФЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ЮГО-ЗАПАДНОМ ОБРАМЛЕНИИ СИБИРСКОГО КРАТОНА: СИНТЕЗ ДАННЫХ ДЛЯ РАННЕДЕВОНСКИХ МАГМАТИЧЕСКИХ АССОЦИАЦИЙ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

А.А. Воронцов¹, Д.В. Коваленко², В.В. Ярмолук², А.В. Никифоров², О.Ю. Перфилова³

¹Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского 1а, Россия

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 109017, Москва, Старомонетный пер., 35, Россия

³Сибирский Федеральный университет, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79, Россия

Раннедевонская Алтае-Саянская рифтовая система (АСРС) распространилась на структуры Восточного и Западного Саяна, Кузнецкого Алатау, Монгольского Алтая. Наиболее крупными ее фрагментами являются Тувинский, Делюно-Юстыдский, Канский, Агульский и Минусинский прогибы, а также впадины Северо-Западной Монголии. В статье обобщены геологические, геохимические и Sr-Nd изотопные характеристики базитов, представленных в АСРС покровами умеренно-щелочных и щелочных базальтов, а также их субвулканическими и интрузивными аналогами. Они участвуют во всех магматических ассоциациях и разделяются на низкотитанистую (TiO_2 от 0.2 до 2.2 мас. %) и высокотитанистую (TiO_2 от 2.2 до 4.3 мас. %) подгруппы. Эти породы характеризуются широкими вариациями изотопных характеристик стронция ($\epsilon_{\text{Sr}}(T)$ от -16 до +30). Высокотитанистые базиты распространены в южном сегменте АСРС, выделяются слабой положительной Ta-Nb аномалией (La/Nb от 0.8 до 1.1), относительно обогащены легкими REE ($(\text{La/Yb})_N$ от 6 до 14) и радиогенным неодимом ($\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ от 3.8 до 8.7). Низкотитанистые разновидности приурочены к северо-западному сегменту АСРС, обогащены Ba, но обеднены Th, U, Nb, Ta (La/Nb от 1.2 до 2.2), Zr и Hf, легкими REE ($(\text{La/Yb})_N$ от 3 до 7) и радиогенным неодимом ($\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ от 2.0 до 6.0). Учитывая существование разных террейнов, совмещенных в структуре Алтае-Саянской складчатой области при аккреции (около 500–480 млн л. н.), предложена модель, предусматривающая разную среду магообразования южного и северо-западного сегментов АСРС и связь магматизма в ее пределах с мантийным плюмом, вещественные характеристики которого соответствуют источникам высокотитанистых магм. Влияние подплавленной части литосферной мантии разного состава под разными группами террейнов привело к наблюдаемой изотопно-геохимической гетерогенности пород основного состава по площади АСРС, в частности отсутствию высокотитанистых базитов в Минусинском прогибе.

Алтае-Саянская рифтовая система, ранний девон, базиты, редкоземельный состав, Sr-Nd изотопные характеристики, магматические источники, плюм-литосферные взаимодействия

GEOLOGICAL AND ISOTOPE-GEOCHEMICAL INDICATORS OF EARLY DEVONIAN PLUME-LITHOSPHERE INTERACTIONS IN THE SOUTHWESTERN FRAMING OF THE SIBERIAN CRATON: DATA SYNTHESIS FOR MAGMATIC ASSOCIATIONS OF THE ALTAI-SAYAN RIFT SYSTEM

A.A. Vorontsov, D.V. Kovalenko, V.V. Yarmolyuk, A.V. Nikiforov, O.Yu. Perfilova

The Early Devonian Altai-Sayan rift system (ASRS) has spread to the structures of East and West Sayan, Kuznetsk Alatau, and Mongolian Altay. Its largest fragments are the Tuva, Delyun-Yustyd, Kan, Agul, and Minusa basins as well as depressions in northwestern Mongolia. The paper summarizes the geologic, geochemical, and Sr-Nd isotope characteristics of the ASRS mafic rocks represented by nappes of moderately alkaline and alkali basalts and their subvolcanic and intrusive rock analogues. They are present in all magmatic associations and are divided into low-Ti ($\text{TiO}_2 = 0.2-2.2$ wt.%) and high-Ti ($\text{TiO}_2 = 2.2-4.3$ wt.%) subgroups. These rocks are characterized by wide variations in Sr isotope characteristics ($\epsilon_{\text{Sr}}(T) = -16$ to +30). High-Ti mafic rocks are common at the southern segment of the ASRS; they show a weak positive Ta-Nb anomaly ($\text{La/Nb} = 0.8-1.1$) and are relatively enriched in LREE ($(\text{La/Yb})_N = 6-14$) and radiogenic Nd ($\epsilon_{\text{Nd}}(T) = 3.8-8.7$). Low-Ti varieties are confined to the northwestern segment of the ASRS; they are enriched in Ba but depleted in Th, U, Nb, Ta ($\text{La/Nb} = 1.2-2.2$), Zr, Hf, LREE ($(\text{La/Yb})_N = 3-7$), and radiogenic Nd ($\epsilon_{\text{Nd}}(T) = 2.0-6.0$). Taking into account the existence of different terranes, which were combined in the structure of the Altai-Sayan folded area during accretion (ca. 500–480 Ma), we propose a model suggesting different environments of magma formation at the southern and northwestern segments of the ASRS and the relationship of magmatism with a mantle plume within the ASRS. In composition the plume corresponds to the sources of high-Ti magmas. The effect of the

© Воронцов А.А., Коваленко Д.В., Ярмолук В.В., Никифоров А.В., Перфилова О.Ю.

✉ e-mail: voront@igc.irk.ru

melted lithospheric mantle of different compositions beneath different groups of terranes led to the observed isotope-geochemical heterogeneity of mafic rocks within the ASRS, in particular, the absence of high-Ti mafic rocks from the Minusa basin.

Altai–Sayan rift system, Early Devonian, mafic rocks, trace element composition, Sr–Nd isotope characteristics, magmatic sources, plume–lithosphere interactions

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В геологической литературе, затрагивающей проблемы эволюции магматизма Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП), большое внимание уделяется оценке составов магматических источников и их связи с механизмами формирования континентальной литосферы. Исследования последних лет, опирающиеся, прежде всего, на геохронологические, геологические и изотопно-геохимические характеристики базитов, которые близки к составу первичных расплавов, показали, что совмещение разных по своей геодинамической природе источников для разновозрастных магматических ассоциаций ЦАСП не является необычным явлением. Так, совмещение плюмовых и субдукционных вещественных характеристик наблюдается в постаккреционных магматических ассоциациях Алтае-Саянской области, сформировавшейся в пределах юго-западного раннепалеозойского складчатого обрамления Сибирского палеоконтинента [Гордиенко, 1987, 2006; Зоненшайн и др., 1990; Владимиров и др., 1999; Перфилова и др., 1999, 2004; Добрецов и др., 2003; Ярмолук и др., 2006, 2011а; Windley et al., 2007; Буслов, 2011; Руднев, 2013; Kröner et al., 2014; Safonova, Santosh, 2014; Крук, 2015; Liu et al., 2017; Zhao et al., 2018].

Особенно выразительно участие разных по природе источников в магнообразовании прослеживается в вулканических комплексах девона. В раннем девоне практически вся территория Алтае-Саянской области была вовлечена в процессы тектономагматической переработки [Берзин, Кунгурцев, 1996]. Они начались с того, что в восточной внутриконтинентальной части этой области, отстоящей на 300—600 км к востоку (в современных координатах) от границы палеоконтинента, с рубежа около 410 млн лет стали активно проявляться процессы рифтогенеза. Именно с ними связано формирование крупной рифтовой системы, строение которой определяют Минусинский, Делюно-Юстыдский и Тувинский прогибы, по обрамлению которых возникли многочисленные прогибы и грабены второго порядка, в том числе Канский, Агульский, Кузнецкого Алатау и Северо-Западной Монголии [Ярмолук, Коваленко, 1991, 2003; Воронцов и др., 1997, 2013; Ярмолук и др., 2000; Гордиенко, 2006; Гринев, 2007; Kuzmin et al., 2010]. Эта система грабенов и прогибов была выделена нами [Воронцов и др., 2010; Ярмолук и др., 2013] как Алтае-Саянская рифтовая система (АСРС) (рис. 1).

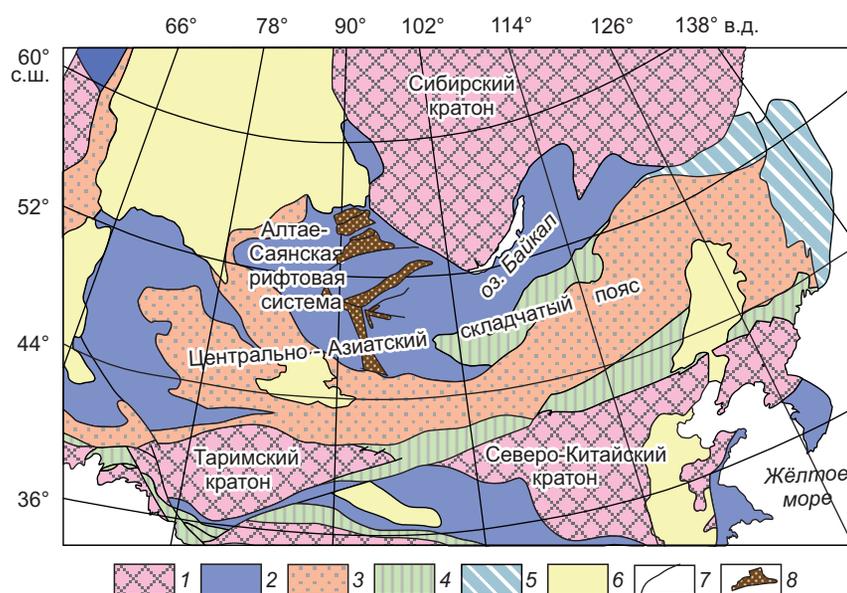


Рис. 1. Тектонические элементы Центральной Азии, по [Atlas..., 2008], и положение Алтае-Саянской рифтовой системы в Центрально-Азиатском складчатом поясе.

1—5 — структуры с консолидированной корой, сформированные: 1 — к началу мезопротерозоя, 2 — к концу неопротерозоя—раннему палеозою, 3 — к позднему карбону, 4 — к среднему триасу, 5 — к началу мела; 6 — мезозойско-кайнозойские плиты и осадочные бассейны; 7 — геологические границы и разломы; 8 — девонские прогибы Алтае-Саянской рифтовой системы.

В конце раннего девона—начале среднего девона (с рубежа 395 млн лет) тектономагматическая активность охватила западный край Алтае-Саянской области, который оказался вовлеченным в процессы конвергенции. В результате здесь сформировалась активная континентальная окраина [Ротарш и др., 1982; Зоненшайн и др., 1990; Владимиров и др., 2003; Windley et al., 2007; Крук и др., 2008; Pirajno, 2010; Кай и др., 2011; Kuibida et al., 2020; Козаков и др., 2022]. Ее образование было связано с субдукцией Чарской океанической плиты под раннепалеозойский ороген и формированием вдоль конвергентной границы краевого вулканоплутонического пояса. В его строении принимают участие риолит-базальтовые, риолит-базальт-риолитовые ассоциации с гранитоидами, возраст которых оценивается в 395—372 млн лет [Куйбида и др., 2015]. К этому же возрастному диапазону, вероятно, следует относить и дифференцированные ассоциации западной части Горного Алтая [Тикунов, 1995; Шокальский и др., 2000; Крук и др., 2008; Крук, Сенников, 2012], отвечающие островодужной толеитовой и известково-щелочной сериям, а также базальтовые комплексы на юге Китайского Алтая, образованные в обстановке зрелого задугового бассейна [Cui et al., 2020].

Удаленность АСРС от конвергентных границ Сибирского палеоконтинента, а также возрастные соотношения между образованием рифтовой системы и активной окраины позволяют рассматривать их как независимые события.

По своему строению девонская магматическая провинция Алтае-Саянской области, включающая АСРС, имеет большое сходство с позднекайнозойской магматической провинцией Восточной Азии [Ярмолук и др., 2011б, 2013; Yarmolyuk et al., 2015]. Ее строение определяют островодужные системы на границе с Тихим океаном, рифтовые структуры вдоль края континента и отдельные вулканические области, рассредоточенные на огромной площади от Японской дуги и Северного Китая вплоть до хребтов Алтая. Здесь формировались вулканы с окраинно-континентальными и внутриконтинентальными (внутриплитовыми) геохимическими характеристиками [Мартынов и др., 1999]. Образование провинции трактуется по-разному. Если магматизм в краевой части континента связывается главным образом с процессами, сопровождающими субдукцию [Wang et al., 2011; Sakuyama et al., 2013], в частности, с взаимодействием астеносферы и литосферной мантии [Hoang, Uto, 2003] или задуговым мантийным апвеллингом [Chen et al., 2017], то происхождение внутриконтинентальных областей никак не вписывается в такие модели. Их магматизм обладает геохимическими и изотопными характеристиками, сближающими их с базальтами ОИВ-типа [Yarmolyuk et al., 2015]. Проявления магматизма в позднем кайнозое начались около 30 млн лет назад [Ярмолук и др., 2011б] и носили опережающий характер по отношению к тектономагматической активности, которая проявилась в краевой части континента примерно около 20 млн лет назад и сопровождалась открытием Японского моря. Отмеченные возрастные различия, а также пространственная удаленность ряда внутриплитных областей от зоны субдукции более чем на 3000 км позволили сформулировать представления о том, что позднекайнозойская вулканическая провинция востока Азии была образована в области взаимодействия горячего поля мантии и конвергентной границы.

Несомненное сходство общего строения магматической провинции востока Азии и девонской вулканической провинции Алтае-Саянской области позволяет предположить для последней связь с крупным мантийным плюмом, который определил черты магматизма, свойственные магматизму крупных изверженных провинций (LIP). Так, сходство АСРС с LIP можно проследить в характеристиках ее магматизма в целом. В составе магматических ассоциаций АСРС доминируют продукты базитового магматизма, которые, подобно базальтам LIP [Ernst, 2014], варьируют по содержанию TiO_2 и несовместимых элементов.

Возникновение в пределах АСРС базитов со смешанными вещественными характеристиками является петрологической проблемой, решение которой в значительной степени связано с оценкой масштабов и механизмов плюм-литосферных взаимодействий, зависящих, в свою очередь, от геологических особенностей строения литосферы огромной по площади Алтае-Саянской складчатой области.

Попытка обобщить сведения по магматизму АСРС, оценить геодинамическую природу рифтовой системы и мантийных магматических источников, формирующихся в ее пределах, была предпринята в работе [Воронцов и др., 2010]. За прошедшие годы получен новый большой материал, требующий внести коррективы в ранее опубликованные представления. Он касается огромной территории, включающей Минусинский и Тувинский прогибы, для магматических пород которых были получены новые изотопно-геохимические данные.

Цель настоящей работы заключается в оценке состава магматических ассоциаций АСРС и их изменчивости в зависимости от строения литосферы рифтовой системы, что позволяет оценивать условия образования магматических источников с позиции плюм-литосферных взаимодействий. Для выяснения зависимости состава вулканических ассоциаций от параметров мантийных источников проведен синтез геохимических и Sr-Nd изотопных характеристик пород разных магматических серий АСРС с использованием данных из работ [Гаврилова, Лувсанданзан, 1983; Воронцов, Ярмолук, 1992, 1993, 2004; Воронцов, 1993, 2022; Ярмолук, Воронцов, 1993; Воронцов и др., 1997, 2008, 2010, 2011, 2013, 2015, 2017, 2018; Коваленко и др., 2004а; Лавренчук и др., 2004; Воронцов, Сандимиров, 2010; Изох и др., 2011;

Врублевский и др., 2016; Сугоракова, Никифоров, 2016; Крупчатников и др., 2018; Mustafaev et al., 2020; Врублевский, Гертнер, 2021; Vorontsov et al., 2021; Ветров и др., 2022].

СТРОЕНИЕ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГМАТИЧЕСКИХ АССОЦИАЦИЙ В ЕЕ ПРЕДЕЛАХ

Строение рифтовой системы. Главной особенностью строения рифтовой системы является широкое развитие в ее пределах разноориентированных грабенов и впадин, ограниченных сбросами, что типично для внутриплитных областей, сформировавшихся в условиях регионального растяжения. Мы кратко охарактеризуем три наиболее крупные структуры рифтовой системы, данные по которым раскрывают общие закономерности распространения базитов со смешанными геохимическими и изотопными параметрами. Две из них представлены Тувинским и Делюно-Юстыдскими прогибами, соприкасающимися друг с другом под углом 100° в точке пересечения, которая приближена к центральной части рифтовой системы (рис. 2). Третий элемент рифтовой системы представлен Минусинским прогибом. Начальная (раннедевонская) стадия формирования прогибов была сопряжена с процессами рифтогенеза, о чем свидетельствуют рои базитовых силлов и даек, зафиксировавших крупноамплитудные вертикальные и горизонтальные растяжения и активный подъем расплавов к поверхности.

Тувинский прогиб прослеживается в северо-восточном направлении на расстояние более 500 км и контролируется субширотной системой разломов. Непосредственно в пределах рифтовой долины [Геология..., 1966] образовывались мощные (более 1000 м) вулканические толщи, сложенные преимущественно лавами низко- и высокотитанистых базальтов нормального и субщелочного рядов щелочности, а также многочисленные дайки базитов. Кислые породы представлены субщелочными риолитами и игнимбритами, доля которых возрастает в восточной части прогиба [Воронцов, Сандимиров, 2010; Сугоракова, Никифоров, 2016; Ветров и др., 2022].

Делюно-Юстыдский прогиб, протянувшийся вдоль структур Алтая в северо-западном направлении на 600 км, характеризуется аналогичным строением. Раннедевонские вулканогенно-осадочные толщи приурочены к основанию прогиба и выходят в основном вдоль юго-западного и западного бортов прогиба почти на всем его протяжении. В центральной и северной частях прогиба с ними ассоциируют красноцветные и пестроцветные континентальные грубообломочные отложения, которые к югу сменяются морскими сероцветными туфогенно-кремнистыми и терригенными отложениями, содержащими горизонты известняков. Среди вулканических ассоциаций прогиба выделяется контрастная базальт-риолитовая и дифференцированная базальт-андезит-дацит-риолитовая с преобладанием высокоглиноземистых низкотитанистых и умеренно-титанистых базальтов [Гаврилова, Лувсанданзан, 1983].

Пояса грабен Северо-Западной Монголии распространены по обрамлению Озерной зоны. Один из них (Цаган-Шибетинский) вытянут вдоль восточного склона Монгольского Алтая более чем на 150 км и, очевидно, входит в область влияния Делюно-Юстыдского прогиба. Другой (Хан-Хухейский) тяготеет к границе Тувино-Монгольского террейна и протягивается по южному склону и центральной части хр. Хан-Хухей на расстояние свыше 250 км. Формирование грабен сопровождалось магматизмом высокой щелочности с широким участием субщелочных и щелочных базальтов, трахитов, щелочных трахириодацитов и пантеллеритов с многочисленными субвулканическими телами пород тех же составов — дифференцированных тешенитов, сиенитов, мариуполитов, щелочных микрогранитов [Ярмолюк, Воронцов, 1993; Воронцов, 1993].

Минусинский прогиб объединяет систему обособленных впадин, распределенных по площади 10 000 км² между горными сооружениями Кузнецкого Алатау, Западного и Восточного Саяна. Наиболее крупными структурами прогиба являются Южно-Минусинская, Сыда-Ербинская и Чебаково-Балахтинская впадины [Луцицкий, 1960]. Состав магматических продуктов в этих впадинах типичен для внутриплитных областей и включает ассоциации пород нормального ряда, а также повышенной щелочности и щелочных: базальтовые, базальт-андезибазальтовые, базальт-трахитовые, бимодальные базальт-трахидацит-трахириолитовые, нефелинит-фонотефритовые, с которыми сопряжены их интрузивные эквиваленты: долериты, тешениты, тералиты и щелочные сиениты [Воронцов и др., 2013]. Вулканические члены этих ассоциаций традиционно объединяют в раннедевонскую вулканогенно-осадочную быскарскую серию, залегающую с угловым и азимутальным несогласием на венд-кембрийских и кембро-ордовикских породах и несогласно перекрытую осадочными отложениями живетского яруса среднего девона. В основании серии часто отмечаются базальные конгломераты.

Распределение магматических ассоциаций в пределах рифтовой системы. В пределах АСРС наиболее широко проявился базитовый магматизм (рис. 2), представленный покровами базальтов, силлами и дайками долеритов [Ярмолюк и др., 2000; Воронцов и др., 2010, 2013]. Широкое распространение также получили бимодальные ассоциации с участием трахибазальтов, трахириолитов-пантеллеритов и щелочных гранитов [Воронцов и др., 1997; Коваленко и др., 2004б; Воронцов, Сандимиров, 2010] и щелочные ассоциации с участием пород разной основности [Гринева, 2007; Уваров, Уварова, 2008,

2009; Врублевский и др., 2016; Врублевский, Гертнер, 2021]. Локальное развитие получила ультрамафит-мафитовая ассоциация, представленная пикритами и пикродолеритами [Изох и др., 2011]. Наряду с такими ассоциациями, типичными для внутриплитных обстановок [Ayalew, Gibson, 2009; Ernst, 2014], здесь также возникли непрерывные базальт-андезит-дацит-риолитовые ассоциации пород [Ярмолюк, Коваленко, 1991; Воронцов и др., 2015, 2018] и ассоциации фельзических пород [Крупчатников и др., 2018], характерные для активных континентальных окраин [Tatsumi, Eggins, 1995; Kelemen et al., 2003].

Базитовая ассоциация включает в себя низкотитанистые и высокотитанистые умеренно-щелочные базальты, рои дифференцированных долеритовых силлов и даек. Базальты резко доминируют среди продуктов магматизма и являются частью мощных (до 2 500 м) осадочно-вулканогенных толщ, сфор-

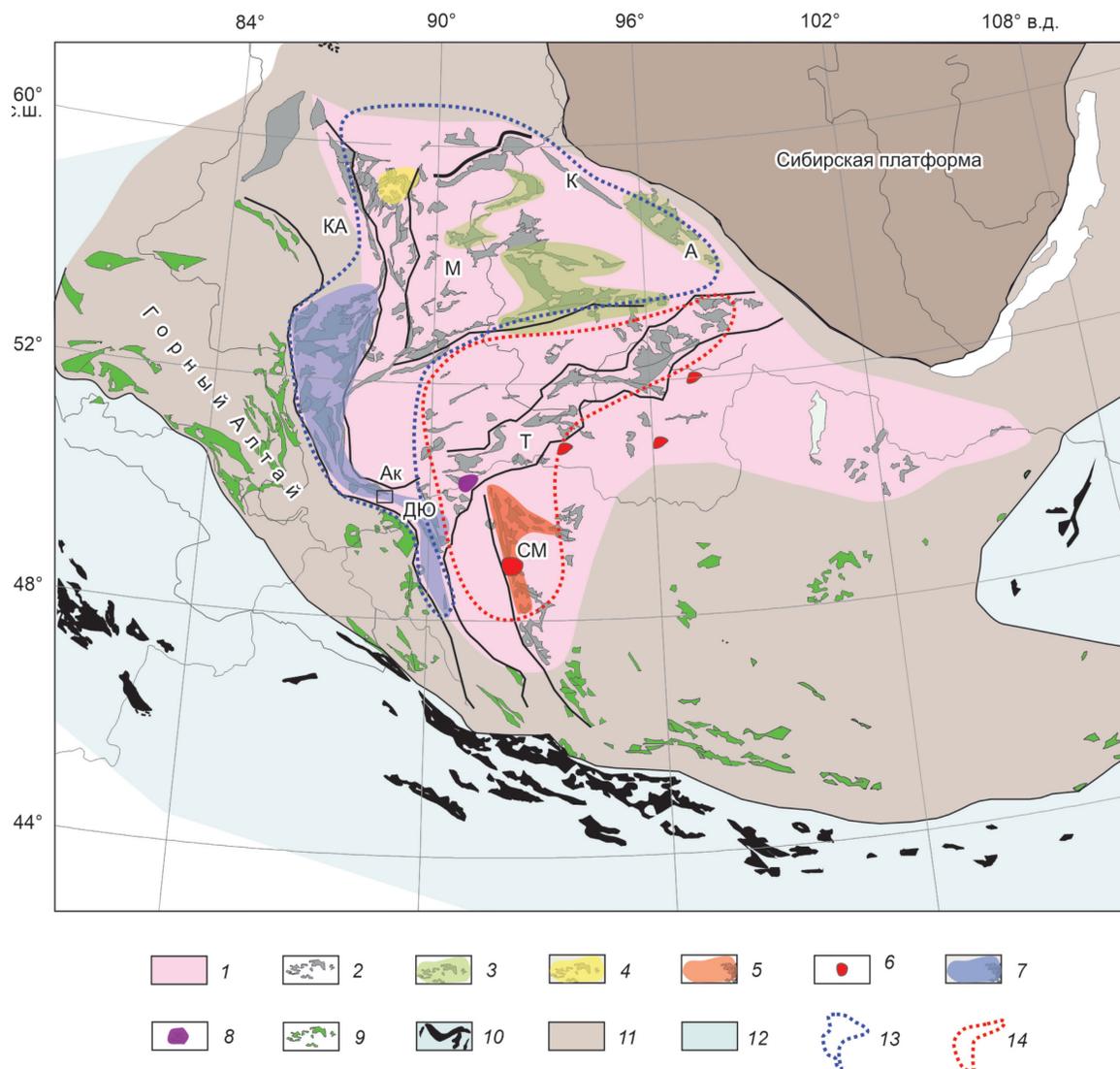


Рис. 2. Схема распространения девонских магматических ассоциаций в раннепалеозойских комплексах Центрально-Азиатского складчатого пояса [Лучицкий, 1960; Гаврилова, Лувсанданзан, 1983; Ярмолюк, Коваленко, 1991; Ярмолюк, Воронцов, 1993; Тикуннов, 1995; Коваленко и др., 20046; Изох и др., 2011; Воронцов и др., 2013, 2015; Ярмолюк и др., 2013; Врублевский и др., 2016; Крупчатников и др., 2018; Врублевский, Гертнер, 2021; Воронцов, 2022].

1 — Алтае-Саянская рифтовая система; 2–8 — раннедевонские магматические ассоциации: 2 — базитовая, 3 — непрерывная базальт-андезит-риолитовая, 4 — щелочная, 5 — бимодальная базальт-трахириолитовая, 6 — щелочно-гранитная, 7 — смешанная (непрерывная и бимодальная), 8 — ультрамафит-мафитовая; 9, 10 — девонские магматические ассоциации, связанные с формированием конвергентной (?) границы континент—океан: 9 — континентальные, 10 — океанические; 11 — раннепалеозойские комплексы обрамления Сибирской платформы; 12 — Палеоазиатский океан; 13 — магматические ассоциации с низкотитанистыми базальтами (от 0.2 до 2.2 мас. % TiO_2) с геохимическими метками IAB, ϵ_{Nd} от 2.0 до 6.0; 14 — магматические ассоциации с широкими вариациями титана (низкотитанистые: от 0.9 до 2.2 мас. % TiO_2 , высокотитанистые: от 2.2 до 4.3 мас. % TiO_2) с геохимическими метками OIB, ϵ_{Nd} от 3.8 до 8.7. Ак — аксайский комплекс, прогибы: Т — Тувинский, КА — Кузнецкого Алатау, ДЮ — Делюно-Юстыдский, К — Канский, А — Агульский, М — Минусинский, СМ — Северо-Западной Монголии.

мированных во всех сегментах АСРС. Так, в Минусинском прогибе, который является самой крупной рифтовой структурой АСРС, эти толщи распространены на площади около 100 000 км², занимают объем не менее 20 000 км³ и относятся к раннесреднедевонской быскарской серии [Луцицкий, 1960; Шнейдер, Зубкус, 1962; Рублев и др., 1999]. Вулканиды вскрываются в обрамлении Минусинского прогиба и в антиклинальных складках — поднятиях внутри прогиба. Возраст вулканитов разных его сегментов подтверждается находками проптеридофитовой флоры в осадочных прослоях. Вулканиды, в свою очередь, с несогласием перекрываются фаунистически охарактеризованными позднедевонскими (последнедевонскими), карбон-пермскими и юрскими отложениями. Породы быскарской серии и ее аналогов вскрываются на северо-западном фланге Канского прогиба в составе ассоциации Черная Сопка [Лавренчук и др., 2004], в Тувинском [Воронцов, Сандимиров, 2010; Сугоракова, Никифоров, 2016] и Агульском прогибах [Ножкин, Смагин, 1979], в Кузнецко-Алатауской периферии Минусинского прогиба [Гринев, 2007] и в отдельном крупном ареале, объединяющем пояса грабенов Северо-Западной Монголии [Воронцов, 1993; Ярмолук, Воронцов, 1993].

Породы *базальт-андезит-трахит-трахидацит-риолитовой ассоциации* проявлены в пределах Минусинского [Воронцов и др., 2015; Воронцов, 2022] и Агульского прогибов [Ножкин, Смагин, 1979] АСРС, формируя лавовые поля площадью от первых десятков до десятков тысяч км². К этой же ассоциации относятся вулканоплутонические ареалы Делюно-Юстыдского прогиба [Гаврилова, Лувсанданзан, 1983], включая аксайский комплекс юго-восточной части Горного Алтая, сложенный андезитами, дацитами, риолитами и лейкогранитами [Крупчатников и др., 2018].

В пределах АСРС выделяется ареал *щелочных ассоциаций*. Он тяготеет к горному раннекаледонскому обрамлению Минусинского прогиба, где контролируются системой Кузнецко-Алатауских глубинных разломов. Вулканиды этого ареала представлены базальтами, нефелинитами, тефритами, фонтотефритами и фонолитами и слагают Горячегорское плато и прилегающие к нему площади [Уваров, Уварова, 2008; Воронцов и др., 2013]. В своем первоначальном виде территория характеризовалась вулканическим рельефом, определяемым близко расположенными вулканами центрального типа. Современная эродированная часть плато составляет около 4.8 тыс. км², объем вулканических продуктов оценивается в 12 тыс. км³. Интрузивные аналоги представлены небольшими (до 2 км²) массивами щелочно-мафитовых пород, сложенных в разных соотношениях умеренно-щелочными и щелочными габбро, тералитами, ийолит-уртитами, фойяитами, а также нефелиновыми и щелочными сиенитами [Макаренко, Коргусов, 1991; Врублевский и др., 2016; Врублевский, Гертнер, 2021].

Породы *бимодальной ассоциации* распространены в Северо-Западной Монголии [Воронцов, 1993; Ярмолук, Воронцов, 1993]. Здесь вулканиды совместно с осадочными комплексами выполняют грабены, которые контролируются крупными разломами по обрамлению Озерной зоны. Возраст вулканических пород отвечает раннему девону и обоснован находками фауны и флоры в осадочных породах ряда опорных разрезов вулканогенно-осадочных толщ [Гаврилова, Лувсанданзан, 1983; Ярмолук, Коваленко, 1991]. Интрузивными аналогами вулканитов являются породы щелочно-гранитных массивов, сосредоточенных в пределах Монгольского Алтая и южного обрамления Тувинского прогиба. Среди них наиболее детально изучена Халдзан-Бурегтейская группа массивов, расположенная вблизи оз. Хараус-Нур [Коваленко и др., 2004а, 2004б].

Ультрамафит-мафитовая ассоциация, являющаяся индикатором высоких температур плавления, выявлена на крайнем северо-западе Монголии севернее оз. Урэг-Нур на восточных склонах хр. Цаган-Шибегу [Изох и др., 2011]. Эта ассоциация включает в себя пикриты и пикродолериты малых интрузий, прорывающих нижнедевонские вулканогенно-осадочные отложения. Район их распространения находится в непосредственной близости от точки соприкосновения Делюно-Юстыдского и Тувинского прогибов, которые здесь образуют три луча, расходящиеся в разные стороны.

Оценивая время магматических событий, сопряженных с развитием АСРС, на основе имеющихся геохронологических Rb-Sr, K-Ar и Ar-Ar [Зубков и др., 1986; Рублев и др., 1999; Malkovets et al., 2003; Лавренчук и др., 2004; Fedoseev, 2008; Изох и др., 2011; Воронцов и др., 2012; Врублевский и др., 2016; Врублевский, Гертнер, 2021] и палеонтологических [Шнейдер, Зубкус, 1962; Захарова, Ананьев, 1990; Сенников и др., 1995] данных, отметим, что все возрасты укладываются в интервал от 420 до 380 млн лет. Однако, учитывая результаты U-Pb датирования [Бабин и др., 2004; Коваленко и др., 2004б; Крупчатников и др., 2018], более уверенно можно говорить о достаточно узком интервале (407—392 млн лет) магматической активности.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И Sr-Nd ИЗОТОПНЫЕ ПАРАМЕТРЫ БАЗИТОВ КАК ОТРАЖЕНИЕ СОСТАВА МАНТИЙНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В магматических ассоциациях АСРС участвуют породы полного спектра по содержанию SiO₂ [Vorontsov et al., 2021] с большой дисперсией по TiO₂ (рис. 3, а). Наиболее широко распространены породы основного состава, к которым относятся умеренно-щелочные и щелочные базальты, а также их

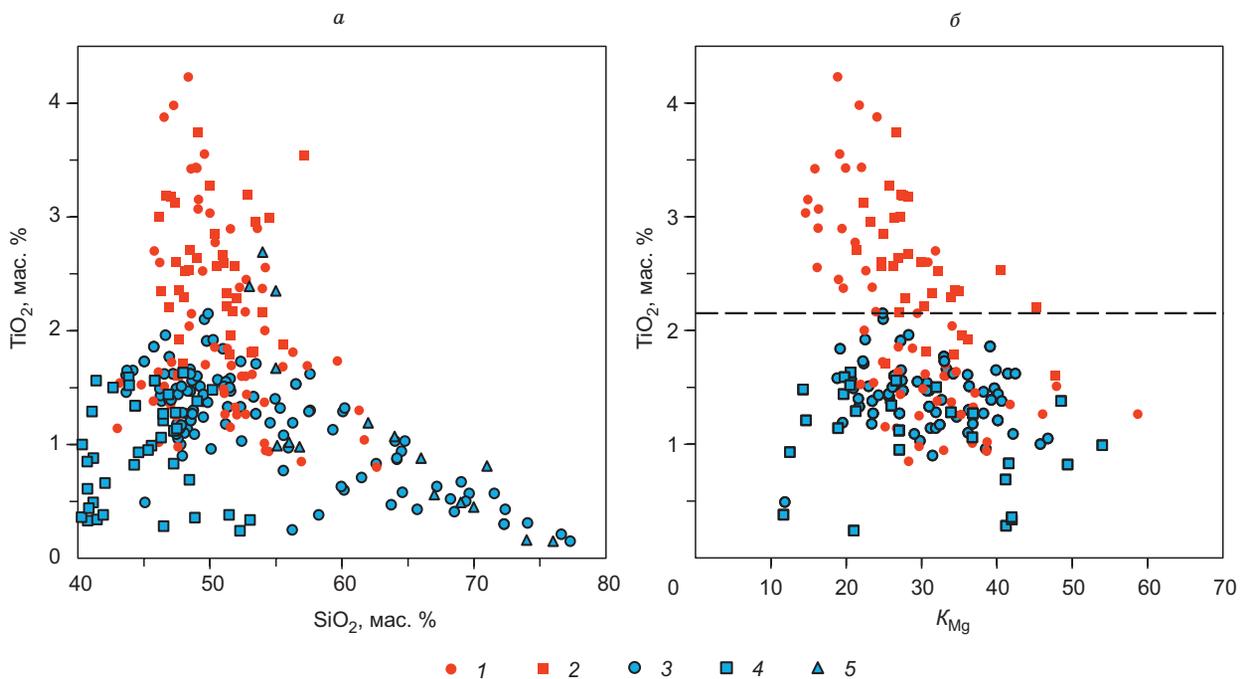


Рис. 3. Двухкомпонентные диаграммы, характеризующие состав пород Алтае-Саянской рифтовой системы:

a — составы всех пород на диаграмме $\text{SiO}_2\text{—TiO}_2$, *б* — составы базитов на диаграмме $K_{\text{Mg}}\text{—TiO}_2$. $K_{\text{Mg}} = 100\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$, ат. кол. 1 — Тувинский прогиб [Сугорокова, Никифоров, 2016; Ветров и др., 2022], 2 — Северо-Западная Монголия [Воронцов, Ярмолук, 1992], 3 — Минусинский прогиб [Воронцов и др., 2013] и Делюно-Юстыдский прогиб (восточный склон Монгольского Алтая) [Гаврилова, Лувсанданзан, 1983; Воронцов, Ярмолук, 1992, 1993], 4 — щелочные породы Минусинского прогиба [Врублевский и др., 2016; Mustafaev et al., 2020], 5 — аксайский комплекс [Крупчатников и др., 2018]. Штриховая линия разделяет составы низкотитанистых и высокотитанистых пород с содержанием 45—53 мас. % SiO_2 .

субвулканические и интрузивные аналоги, варьирующие по кремнезему в диапазоне 45—53 мас. % SiO_2 . Такие породы имеют мантийное происхождение, что позволяет оценить вещественные характеристики мантийных источников магматизма практически по всей площади АСРС. Породы основного состава по содержанию TiO_2 разделяются на низкотитанистую (TiO_2 от 0.2 до 2.2 мас. %) и высокотитанистую (TiO_2 от 2.2 до 4.3 мас. %) подгруппы (рис. 3, б). Коэффициент магнезиальности ($K_{\text{Mg}} = 100\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$, ат. кол.) в обеих подгруппах изменяется в широких пределах (12—59) при отсутствии корреляции с содержанием TiO_2 .

Распределение этих подгрупп по площади рифтовой системы подчиняется ярко выраженной закономерности. Так, низкотитанистые и высокотитанистые породы участвуют в вулканических ареалах Тувинского прогиба и Северо-Западной Монголии (см. рис. 2), в то время как в пределах Минусинского и Делюно-Юстыдского прогибов распространена только низкотитанистая подгруппа. По сравнению с N-MORB базиты АСРС в целом обогащены редкими литофильными элементами, в том числе редкоземельными элементами (REE), и занимают промежуточное положение между составами OIB и IAB (рис. 4).

В то же время они характеризуются вполне определенными различиями в относительном распределении несовместимых элементов, которые прямо коррелируются с содержанием TiO_2 .

Высокотитанистые базиты Тувинского прогиба и Северо-Западной Монголии выделяются слабой положительной Nb-Ta аномалией ($(\text{Nb}/\text{La})_N$ от 0.7 до 1.1, $(\text{Ta}/\text{La})_N$ от 0.8 до 1.1), относительно обогащены легкими REE ($(\text{La}/\text{Yb})_N$ от 6 до 14) и по геохимическим параметрам близки к базальтам типа OIB. В отличие от них, все низкотитанистые базиты в основном обеднены высокозарядными некогерентными элементами Th, U, Nb, Ta ($(\text{Nb}/\text{La})_N$ от 0.2 до 0.4, $(\text{Ta}/\text{La})_N$ от 0.2 до 0.5), в меньшей степени — Zr и Hf, легкими REE ($(\text{La}/\text{Yb})_N$ от 3 до 7), но обогащены Ba. При этом низкотитанистые базиты Минусинского и Делюно-Юстыдского прогибов в наибольшей степени обеднены титаном по сравнению с другими низкотитанистыми базитами АСРС, что отразилось в пониженных содержаниях высокозарядных гидрофобных элементов (см. рис. 4). Подобные черты состава низкотитанистых базитов сближают их с породами, сформированными в субдукционных обстановках.

Различия составов пород, принадлежащих разным фрагментам АСРС, по-видимому, можно связать с преобладанием в формировании соответствующих структур разных источников магматизма. Эти различия подтверждаются изотопными данными, представленными на графике $\varepsilon_{\text{Sr}}(T)\text{—}\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ (рис. 5).

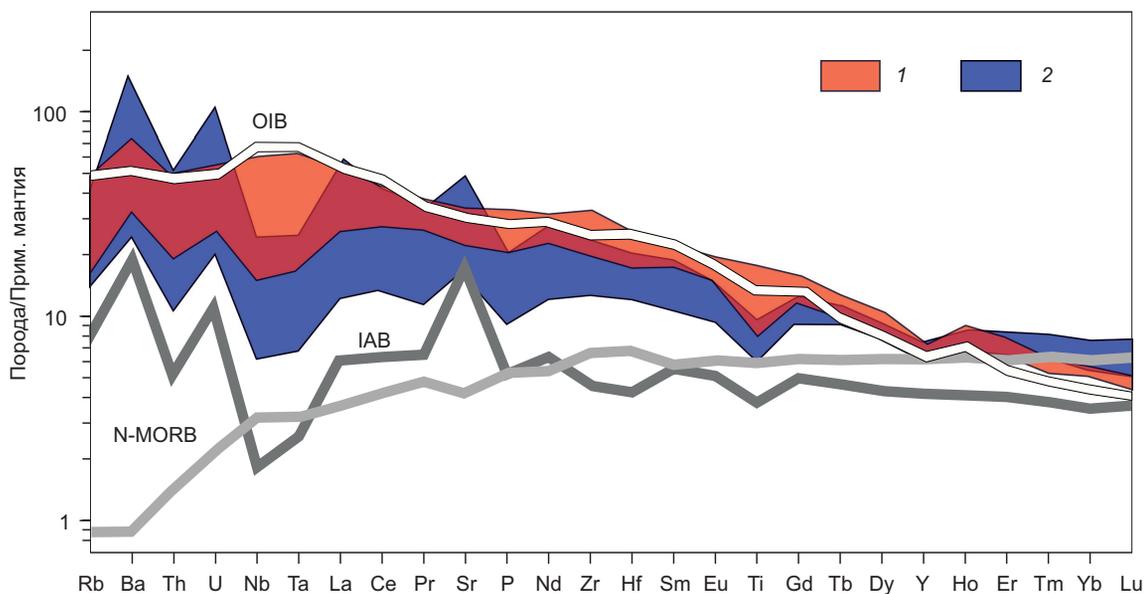


Рис. 4. Мультиэлементные спектры в базитах (45 мас. % SiO_2 < 53 мас. %) Алтае-Саянской рифтовой системы.

1 — высокотитанистые и умеренно-титанистые базиты Тувинского прогиба [Сугоракова, Никифоров, 2016; Ветров и др., 2022] и Северо-Западной Монголии [Воронцов, Ярмолюк, 1992]; 2 — умеренно-титанистые базиты Минусинского прогиба [Воронцов и др., 2010, 2011, 2013, 2015, 2017, 2018; Врублевский и др., 2016; Mustafaev et al., 2020] и Делюно-Юстыдского прогиба [Воронцов, Ярмолюк, 1992, 1993; Крупчатников и др., 2018]. Составы OIB (базальты океанических островов), IAB (базальты островных дуг), N-MORB (деплетированные базальты срединно-океанических хребтов), по [Sun, McDonough, 1989].

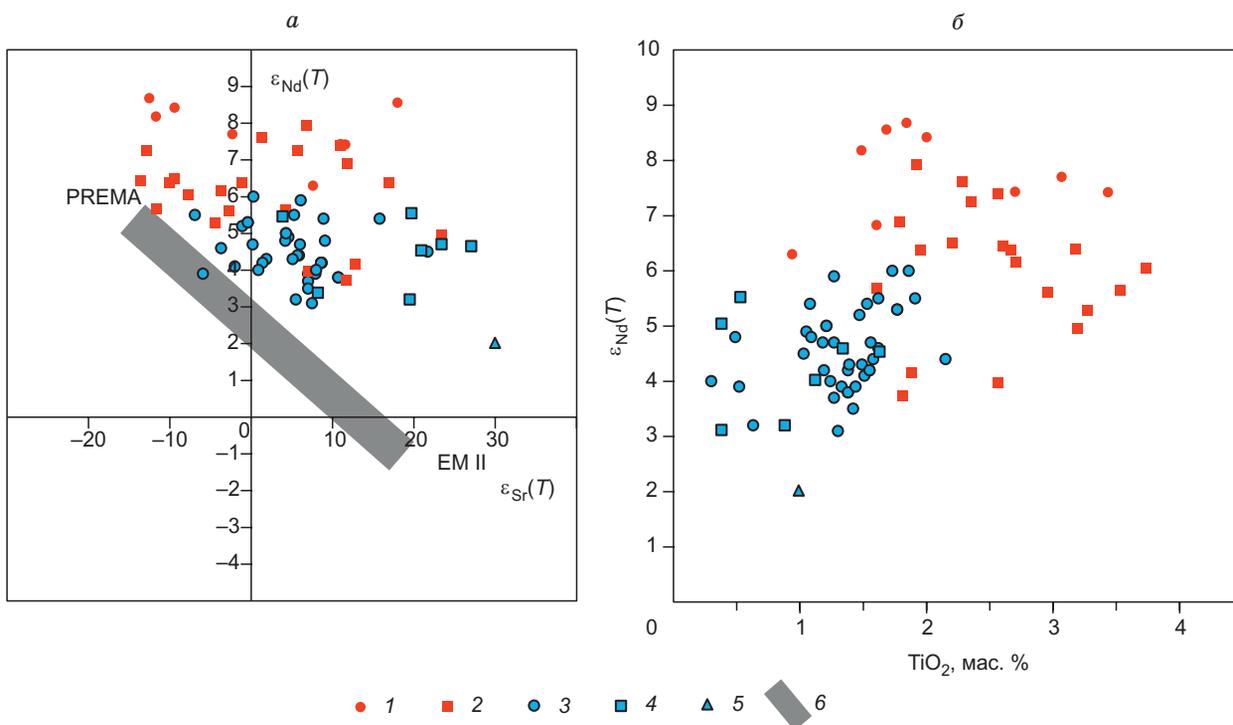


Рис. 5. Составы базитов (45 мас. % SiO_2 < 53 мас. %) Алтае-Саянской рифтовой системы на диаграммах: *a* — $\varepsilon_{\text{Sr}}(T)$ — $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$, *б* — $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ — TiO_2 , $T = 400$ млн лет.

1 — Тувинский прогиб [Сугоракова, Никифоров, 2016; Ветров и др., 2022], 2 — Северо-Западная Монголия [Воронцов, Ярмолюк, 1992], 3 — Минусинский прогиб [Воронцов и др., 2010, 2011, 2013, 2015, 2017, 2018; Vorontsov et al., 2021], 4 — щелочные породы Минусинского прогиба [Mustafaev et al., 2020; Врублевский, Гертнер, 2021], 5 — аксайский комплекс [Крупчатников и др., 2018], 6 — тренд мантийной корреляции. PREMA — преобладающая мантия, EM II — мантия, обогащённая радиогенным стронцием.

Точки составов всех пород здесь группируются в две области, каждая из которых отвечает породам с широкими вариациями изотопных характеристик стронция (ϵ_{Sr} , от -13 до $+30$) и вытянута субпараллельно оси $\epsilon_{Sr}(T)$, отклоняясь от области «мантийной корреляции». Для пород Тувинского прогиба и Северо-Западной Монголии характерны более высокие значения радиогенного неодаима (ϵ_{Nd} от 3.8 до 8.7) по сравнению с породами Минусинского и Делюно-Юстыдского прогибов (ϵ_{Nd} от 2.0 до 6.0).

Таким образом, геохимические и изотопные параметры базитов АСРС отличаются неоднородностью, которая, как можно предположить, отражает разную степень вовлечения источников плюмовой и надсубдукционной природы, участвовавших в образовании рифтовой системы.

Плюм-литосферные взаимодействия как причина изотопной неоднородности магматических источников. Отметим, что в базальтах LIP наблюдаются широкие вариации геохимических и изотопных (Sr, Nd) параметров [Ernst, 2014]. Низкотитанистый характер базальтовых магм LIP обычно интерпретируется как отражение контаминации субконтинентальной литосферой или континентальной корой [Carlson, 1991; Ewart et al., 2004], высокой степени частичного плавления верхней мантии или

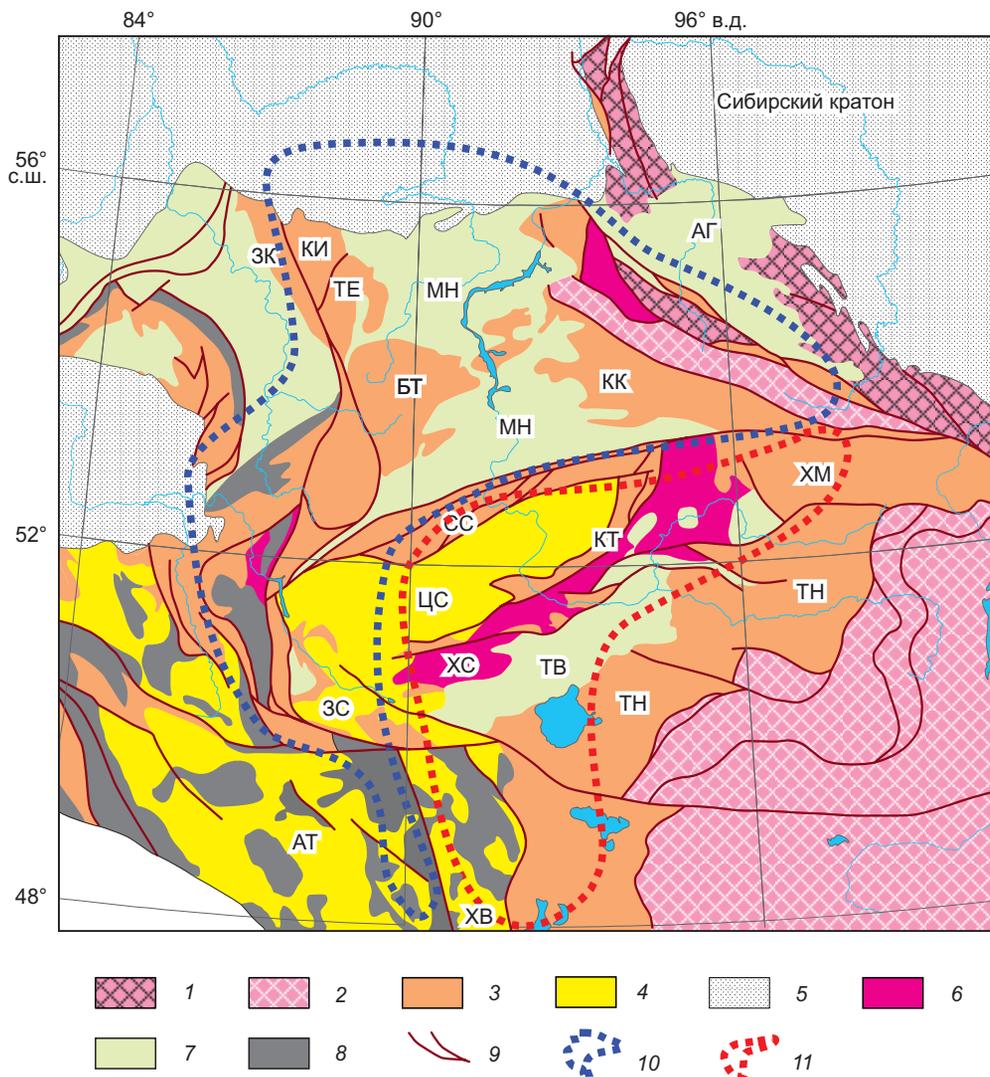


Рис. 6. Области распространения магматических ассоциаций Алтае-Саянской рифтовой системы с базитами, обладающими различными изотопно-геохимическими характеристиками.

Составлено на основе карты террейнов и перекрывающих комплексов юго-западного обрамления Сибирского кратона, по [Метелкин, 2013], и геодинамической карты Северо-Восточной Азии, по [Parfenov et al., 2003], с упрощениями.

1 — Сибирский кратон и кратонные террейны; 2 — микроконтиненты с позднекембрийско-палеозойским чехлом; 3 — островодужные террейны венда—кембрия (включающие офиолитовые пояса, комплексы аккреционных призм, островных дуг и задуговых бассейнов): БТ — Батеневский (задугового бассейна), ЗК — Золотokitатский (аккреционной призмы и островной дуги), КИ — Кийский (островной дуги), КТ — Куртушбинский (аккреционной призмы), СС — Северо-Саянский (аккреционной призмы и островной дуги), ТЕ — Терсинский (островной дуги и задугового бассейна); КК — Кизир-Кызырский (нерасчлененный),

плавления на небольших глубинах [Arndt et al., 1993; Xu et al., 2004]. В противовес этому высокотитанистые мафические серии LIP, обладающие высокими величинами Ti/Yb, Nb/Th, показывают геохимическое сходство с внутриплитными базальтами типа OIB, что объясняется плавлением вещества неконтаминированной астеносферной мантии или плюмового компонента [Ewart et al., 2004; Pearce et al., 2021]. Для базальтов таких серий плюмовый источник может быть реконструирован по более высоким величинам ϵ_{Nd} по сравнению с низкотитанистыми базальтами. В то же время существует разнообразие высокотитанистых базальтов континентальных LIP [Puffer, 2001]. Среди них появляются базальты с отрицательной Nb-Ta аномалией ($(Nb/La)_N < 1$, $(Ta/La)_N < 1$), которые могут быть индикаторами взаимодействия расплавов с литосферной мантией, модифицированной ранее субдукционными процессами. Подобные характеристики, например, демонстрируют основные породы позднемезозойских—кайнозойских внутриплитных вулканических областей Центральной Азии [Ярмолюк и др., 2011б]. В раннем мелу они продуцировали базальты, которые, несмотря на общую обогащенность несовместимыми элементами, обладали выраженным Nb-Ta минимумом. В конце раннего мела эта их особенность постепенно нивелировалась, и уже в самом конце раннего—начале позднего мела базиты стали характеризоваться Nb-Ta максимумами и обрели полное сходство с базальтами OIB-типа. Такая изменчивость состава основных пород этих областей во времени была связана с воздействием мантийных плюмов на метасоматизированную мантию [Yarmolyuk et al., 2015]. По мере развития магматизма этих областей метасоматизированный компонент был усвоен мантией и в дальнейшем уже не мог влиять на состав магматических расплавов.

Непрерывные магматические ассоциации АСРС имеют геохимические черты, близкие к низкотитанистым базальтам трапповых провинций, и, подобно траппам Параны, сопровождаются проявлениями кислого магматизма, являющегося результатом корового анатексиса [Hawkesworth et al., 2000]. Базиты бимодальной ассоциации сопоставляются с высокотитанистыми базальтами трапповых областей, для которых предполагается плюмовый источник типа OIB [Ernst, 2014].

Обобщение полученных на сегодняшний день данных о составе базитов АСРС указывает на то, что базальтовые, бимодальные, непрерывные, а также щелочные магматические ассоциации формировались при участии источников магматизма двух типов. Ими определена смена ассоциаций с участием высокотитанистых базитов южного сегмента АСРС, включающего Тувинский прогиб и Северо-Западную Монголию, ассоциациями с низкотитанистыми базальтами, которые распространены в северо-западном сегменте АСРС, прежде всего, в Минусинской котловине. Эта смена не вписывается в предполагаемую общую вещественную зональность магматизма, определяемую сменой от известково-щелочных к щелочным типам ассоциаций по мере удаления от границы океан—континента в глубь континента и характерной для магматических серий активных континентальных окраин андийского типа. Так, достаточно отчетливо проявлено влияние источников, сформированных во внутриплитовых условиях. Вероятно, этим можно объяснить такие геохимические особенности базитов южного сегмента АСРС, как повышенные содержания LREE и ряда других литофильных редких элементов, соответствующие составу базальтов типа OIB. Второй тип источников представляют базиты северного сегмента АСРС. Они характеризуются широкими вариациями литофильных редких элементов на фоне высоких содержаний Ba, Sr, U и ярко выраженными Nb-Ta-Ti минимумами на спайдер-диаграммах, типичными для проявлений субдукционного магматизма.

Характеризуя изотопный состав, выше показано, что мантия под АСРС была изотопно-гетерогенной, но в ее структуре также статистически выделяются два домена с близкими Sr-Nd изотопными отношениями, которые уверенно увязываются с геохимическими параметрами выплавляемых из нее базитовых магм. Эти изотопные домены мантии соответствуют южному и северо-западному сегментам АСРС, выделенным на основе геохимических данных, показывая тем самым, что контроль над редкоэлементным и изотопным составом имел одинаковую природу. Здесь возникает главный вопрос: является ли подобная неоднородность следствием случайной неоднородности астеносферной мантии по

ТН — Таннуольский (островной дуги и задугового бассейна); 4 — турбидитовые террейны континентальных окраин, в том числе ЦС — Центрально-Саянский (кембрий—силур), АТ — Алтайский (кембрий—девон), ХВ — Ховдинский (неопротерозой—силур), ЗС — Западно-Саянский (поздний непротерозой—девон); 5 — перекрывающие комплексы чехла Сибирского кратона и Западно-Сибирской низменности; 6 — перекрывающие комплексы раннепалеозойских бассейнов: ХС — Хемчикско-Сыстыгхемский (молассовый, ордовик—силур); 7 — комплексы позднепалеозойско-раннемезозойских бассейнов: АГ — Агульский (вулканогенно-осадочный, молассовый, девон—мезозой), МН — Минусинский (вулканогенно-осадочный, молассовый, девон—пермь), ТВ — Тувинский (вулканогенно-осадочный, молассовый, девон—карбон), ХМ — Хмелевский (тыловой, вулканогенно-осадочный, девон—карбон); 8 — Алтайский вулканоплутонический пояс (девон—карбон); 9 — главные разломы; 10 — магматические ассоциации с низкотитанистыми базальтами (от 0.2 до 2.2 мас. % TiO₂) с геохимическими метками IAB, ϵ_{Nd} от 2.0 до 6.0; 11 — магматические ассоциации с широкими вариациями титана (низкотитанистые: от 0.9 до 2.2 мас. % TiO₂, высокотитанистые: от 2.2 до 4.3 мас. % TiO₂) с геохимическими метками OIB, ϵ_{Nd} от 3.8 до 8.7.

латерали или она возникла под влиянием взаимодействия мантийных расплавов плюмового происхождения с литосферной мантией региона? Для его решения проанализируем более детально структуру континентальной литосферы, в пределах которой формировалась АСРС. Так, в соответствии с данными [Берзин, Кунгурцев, 1996], эта структура определяется сложным рисунком в виде аккреционной мозаики, образованной комплексами субдукционной природы (активных континентальных окраин, задуговых бассейнов, аккреционных призм, внутренних магматических дуг), пассивных окраин и офиолитовых поясов. На карте террейнов юго-западного обрамления Сибирского кратона, предложенной в работе [Метелкин, 2013], АСРС перекрывает две группы террейнов. Одна из них является фундаментом для девонских магматических комплексов Минусинского прогиба и той части Кузнецкого Алатау, которая включает северный фланг Делюно-Юстыдского прогиба (Кузнецко-Алатауское звено: Батеневский, Кийский, Терсинский, Золотокидатский террейны). Другая группа (Западно-Саянское звено: Куртушибинский и Северо-Саянский террейны) подстилает девонские магматические ассоциации Тувинского прогиба (рис. 6).

На основе палеомагнитных данных [Метелкин, 2013] показано, что в раннепалеозойский доаккреционный этап (около 540—520 млн лет) обе группы террейнов были выстроены в линейную зону вдоль юго-западного фланга Сибирского палеоконтинента. При этом они были разнесены в разные фланги островодужной системы на расстояния, исчисляемые сотнями и даже тысячами километров при сравнении крайних позиций террейнов каждой группы, что указывает на заведомо разный характер формирования их литосферы. Из этого следует, что эти террейны, совмещенные в современной структуре Алтае-Саянской складчатой области в момент аккреции (в интервале примерно 500—480 млн л. н.), сформировали вещественную (изотопно-геохимическую) неоднородность литосферной мантии складчатой области в целом. Это указывает на разную среду магмообразования южного и северо-западного сегментов АСРС и позволяет предложить модель, в которой главной движущей силой, приведшей к рифтогенному магматизму, служил мантийный плюм с астеносферной линзой в основании литосферы. Его вещественные характеристики соответствуют источникам, из которых выплавлялись высокотитанистые магмы. В этом случае влияние подплавленной части литосферной мантии разного состава под разными группами террейнов должно привести к наблюдаемой изотопно-геохимической гетерогенности базитов по площади АСРС, в частности, отсутствию высокотитанистых базитов в Минусинской котловине.

Оценивая в целом состав базитовых магм в разных сегментах АСРС, отметим, что материнские расплавы уверенно реагировали на участие водного флюида в магмообразовании, что отразилось, прежде всего, в относительно пониженных содержаниях литофильных элементов, обеднении гидрофобными элементами Nb, Ta и Ti, а также в меньшей степени фракционирования редкоземельных элементов, которые коррелируют с изотопным составом магмообразующего мантийного источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексирование геологических и изотопно-геохимических данных позволяет связать магматизм Алтае-Саянской рифтовой системы с существованием раннедевонского мантийного плюма и разномасштабным его взаимодействием с литосферной мантией, о чем свидетельствует:

1. Существование точки тройного соединения лучей, каждый из которых трассирует крупные прогибы в центральной части рифтовой системы. Эту точку можно рассматривать как проекцию верхней части мантийного плюма на континентальную поверхность, что обеспечило высокие степени частичного плавления и возникновение пикритоподобных пород.

2. Большой объем (до 0.1 млн км³) продуктов магматизма и большая площадь их распространения (около 300 000 км²).

3. Близкий возраст магматических событий, в результате которых в пределах рифтовой системы были образованы ареалы умеренно-щелочных и щелочных преимущественно дифференцированных серий.

4. Распространенность пород мантийного генезиса по всей площади рифтовой системы и их участие во всех магматических ассоциациях. При этом в большинстве ассоциаций такие породы доминируют. В вулканических сериях они представлены базальтами, трахибазальтами, тефритами и фонотефритами, в интрузивных сериях — габброидами, пикродолеритами, тешенитами, ийолитами и уртитам.

5. Базиты в целом обогащены редкими литофильными элементами, но обладают неоднородными изотопно-геохимическими сигнатурами, которые объяснимы разнородным участием литосферной мантии, метасоматизированной во время предшествующих каледонских аккреционных и субдукционных событий.

6. Различия в изотопно-геохимических характеристиках девонских базитов АСРС определяются составом литосферной мантии под разными террейнами субдукционной природы, которые аккретировали к юго-западному обрамлению Сибирского палеоконтинента в возрастном интервале 500—480 млн лет.

7. Основные черты магматизма АСРС близки к характеристикам крупных изверженных провинций (LIP), сопряженных с развитием мантийных плюмов.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на проведение НИР ИГХ СО РАН по теме № 0284-2021-0006, НИР ИГЕМ РАН по теме № 121041500224-8 и при финансовой поддержке РФФ, проект № 22-17-00033.

ЛИТЕРАТУРА

Бабин Г.А., Владимиров А.Г., Крук Н.Н., Сергеев С.А., Сенников Н.В., Гибшер А.С., Советов Ю.К. Возраст заложения Минусинских впадин (Южная Сибирь) // ДАН, 2004, т. 395, № 3, с. 367—370.

Берзин Н.А., Кунгурцев Л.В. Геодинамическая интерпретация геологических комплексов Алтае-Саянской области // Геология и геофизика, 1996, т. 37 (1), с. 63—81.

Буслов М.М. Тектоника и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса: роль позднепалеозойских крупноамплитудных сдвигов // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (1), с. 66—90.

Ветров Е.В., Уваров А.Н., Андреева Е.С., Ветрова Н.И., Жимулев Ф.И., Степанов А.С., Вишневская И.А., Червяковская М.В. Среднепалеозойский магматизм Центрально-Тувинского прогиба (восточная часть Алтае-Саянской складчатой области): петрогенезис, тектоника и геодинамика // Геология и геофизика, 2022, т. 63 (12), с. 1607—1629, doi: 10.15372/GiG2021187.

Владимиров А.Г., Гибшер А.С., Изох А.Э., Руднев С.Н. Раннепалеозойские гранитоидные батолиты Центральной Азии: масштабы, источники и геодинамические условия формирования // ДАН, 1999, т. 369, № 6, с. 795—798.

Владимиров А.Г., Крук Н.Н., Руднев С.Н., Хромых С.В. Геодинамика и гранитоидный магматизм коллизионных орогенов // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (12), с. 1321—1338.

Воронцов А.А. Петрохимическая характеристика девонского субщелочного-щелочного магматизма Северо-Западной Монголии // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (8), с. 117—124.

Воронцов А.А. Фракционирование и ассимиляция при формировании девонской антидромной магматической серии Сисимского ареала в Минусинском прогибе: геохимические и Sr-Nd изотопные доказательства // Геодинамика и тектонофизика, 2022, т. 13, № 4, 0649, doi: 10.5800/GT-2022-13-4-0649.

Воронцов А.А., Ярмолюк В.В. Девонские магматические ассоциации со щелочными породами Северо-Западной Монголии // Геология и геофизика, 1992 (8), с. 62—68.

Воронцов А.А., Ярмолюк В.В. Петрогеохимические особенности базитов девонских грабенов Северо-Западной Монголии // ДАН, 1993, т. 328, № 4, с. 494—498.

Воронцов А.А., Ярмолюк В.В. Северо-Монгольская-Забайкальская полихронная рифтовая система (этапы формирования, магматизм, источники расплавов, геодинамика) // Литосфера, 2004, № 3, с. 17—32.

Воронцов А.А., Сандимиров И.В. Девонский вулканизм хребта Кропоткина (Восточный Саян) и источники базитов: геологические, геохимические и изотопные Sr-Nd данные // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (8), с. 1073—1087.

Воронцов А.А., Ярмолюк В.В., Иванов В.Г., Сандиминова Г.П., Пахольченко Ю.А. Источники базитовых расплавов девонских бимодальных рифтогенных магматических ассоциаций Центральной Азии (на основе данных о редких элементах и изотопах стронция в базитах Северо-Западной Монголии) // Петрология, 1997, т. 5, № 3, с. 236—252.

Воронцов А.А., Ярмолюк В.В., Сандиминова Г.П. Базальт-трахириолит-комендитовая ассоциация хребта Кропоткина (Восточный Саян) и проблема девонского рифтогенеза в южном обрамлении Сибирской платформы // ДАН, 2008, т. 423, № 2, с. 222—227.

Воронцов А.А., Ярмолюк В.В., Федосеев Г.С., Никифоров А.В., Сандиминова Г.П. Изотопно-геохимическая зональность магматизма девонской Алтае-Саянской рифтовой области: к оценке состава и геодинамической природы мантийных магматических источников // Петрология, 2010, т. 18, № 6, с. 621—634.

Воронцов А.А., Федосеев Г.С., Андрющенко С. В., Пахольченко Ю.А. Источники девонского магматизма Минусинского прогиба (по геохимическим и изотопным Sr-Nd характеристикам базитов) // ДАН, 2011, т. 441, № 4, с. 514—520.

Воронцов А.А., Федосеев Г.С., Перфилова О.Ю., Травин А.В. Девонский вулканизм Минусинской котловины: этапы проявления и связь с прогибанием континентальной литосферы (по результатам ^{40}Ar - ^{39}Ar геохронологических исследований) // ДАН, 2012, т. 447, № 3, с. 308—313.

Воронцов А.А., Федосеев Г.С., Андрющенко С.В. Девонский вулканизм Минусинского прогиба Алтае-Саянской области: геологические, геохимические и изотопные Sr-Nd характеристики пород // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (9), с. 1283—1313.

Воронцов А.А., Ярмолюк В.В., Федосеев Г.С., Перфилова О.Ю., Посохов В.Ф., Травин А.В., Газизова Т.Ф. Дифференцированная вулканическая ассоциация Минусинского прогиба: механизмы об-

разования и источники расплавов (на примере Батеневского поднятия) // Петрология, 2015, т. 23, № 4, с. 386—409, doi: 10.7868/S0869590315040068.

Воронцов А.А., Перфилова О.Ю., Буслов М.М., Травин А.В., Махлаев М.Л., Дриль С.И., Катраевская Я.И. Плюмовый магматизм северо-восточной части Алтае-Саянской области: этапы, состав источников, геодинамика (на примере Минусинского прогиба) // ДАН, 2017, т. 472, № 4, с. 449—455, doi: 10.7868/S0869565217040223.

Воронцов А.А., Перфилова О.Ю., Крук Н.Н. Геодинамическое положение, строение и состав непрерывных трахибазальт-трахиандезит-риолитовых серий северной части Алтае-Саянской области: роль коромантийного взаимодействия в континентальном магмообразовании // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (12), с. 2055—2078, doi: 10.15372/GiG20181209.

Врублевский В.В., Гертнер И.Ф. Палеозойские щелочно-мафитовые интрузии Кузнецкого Алатау, их источники и условия образования расплавов // Петрология, 2021, т. 29, № 1, с. 31—63, doi: 10.31857/S0869590321010088.

Врублевский В.В., Гринев О.М., Изох А.Э., Травин А.В. Геохимия, изотопная (Nd-Sr-O) триада и ^{40}Ar - ^{39}Ar возраст палеозойских щелочно-мафитовых интрузий Кузнецкого Алатау (на примере Белогорского плутона) // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (3), с. 592—602, doi: 10.15372/GiG20160308.

Гаврилова С.П., Лувсанданзан Б. Девонский магматизм. Западная Монголия // Континентальный вулканизм Монголии. М., Наука, 1983, с. 6—9.

Геология СССР. Тувинская АССР. Часть 1. Геологическое описание. М., Недра, 1966, т. 29, 460 с.

Гордиенко И.В. Палеозойский магматизм и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса. М., Наука, 1987, 238 с.

Гордиенко И.В. Геодинамическая эволюция поздних байкалид и палеозоид складчатого обрамления юга Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (1), с. 53—70.

Гринев О.М. Рифтовые системы Сибири: методология изучения, морфотектоника, минералогия. Томск, Изд-во СГТУ, 2007, 434 с.

Добрецов Н.Л. Эволюция структур Урала, Казахстана, Тянь-Шаня и Алтае-Саянской области в Урало-Монгольском складчатом поясе (Палеоазиатский океан) // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (1—2), с. 5—27.

Захарова Т.В., Ананьев А.Р. О стратиграфическом положении быскарской серии девона Минусинского прогиба // Бюл. МОИП. Отд. геол., 1990, т. 65, вып. 2, с. 44—50.

Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР, в 2 кн. М., Недра, 1990, кн. 1, 328 с.

Зубков В.С., Пахольченко Ю.А., Сандимирова Г.П., Мамитко В.Р., Плюснин Г.С. Рубидий-стронциевый возраст и генезис щелочных оливиновых базальтов Минусинской системы впадин // Докл. АН СССР, 1986, т. 290, № 4, с. 960—963.

Изох А.Э., Вишневский А.В., Поляков Г.В., Шелепаев Р.А. Возрастные рубежи пикритового и пикродолеритового магматизма Западной Монголии // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (1), с. 10—31.

Кай Кеда, Сун Мин, Ян Чао, Лонг Хиаопин, Хиао Венджи. Обзор геологического строения Китайского Алтая (Северо-Западный Китай) и его тектонической эволюции в палеозое // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (12), с. 2056—2074.

Коваленко В.И., Ярмолук В.В., Ковач В.П., Сальникова Е.Б., Козловский А.М., Котов А.Б., Ханчук А.И. Вариации источников магм щелочных гранитоидов и связанных с ними пород Халдзан-Бурегтейской группы массивов (Западная Монголия) по изотопным (неодим, стронций и кислород) и геохимическим данным // Петрология, 2004а, т. 12, № 6, с. 563—585.

Коваленко В.И., Ярмолук В.В., Сальникова Е.Б., Карташов П.М., Ковач В.П., Козаков И.К., Козловский А.М., Котов А.Б., Пономарчук В.А., Листратова Е.Н., Яковлева С.З. Халдзан-Бурегтейский массив щелочных и редкометалльных пород: строение, геохронология и геодинамическое положение в каледонидах западной Монголии // Петрология, 2004б, т. 12, № 5, с. 467—494.

Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Иванова А.А., Плоткина Ю.В. Этапы формирования Южно-Алтайского метаморфического пояса (Центральная Азия) // Геология и геофизика, 2022, т. 63 (3), с. 356—370, doi: 10.15372/GiG2021125.

Крук Н.Н. Континентальная кора Горного Алтая: этапы формирования и эволюции, индикаторная роль гранитоидов // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (8), с. 1403—1423, doi: 10.15372/GiG20150801.

Крук Н.Н., Сенников Н.В. Геологическая позиция, геохимические особенности и геодинамическая обстановка формирования позднеживетско-раннефранских базальтов центральной части Горного Алтая // ДАН, 2012, т. 446, № 5, с. 550—555.

Крук Н.Н., Бабин Г.А., Крук Е.А., Руднев С.Н., Куйбида М.Л. Петрология вулканических и плутонических пород Уймено-Лебедского ареала, Горный Алтай // Петрология, 2008, т. 16, № 5, с. 548—568.

Крупчатников В.И., Врублевский В.В., Крук Н.Н. Геохимия, изотопный (Sr,Nd,O) состав и петрогенезис раннедевонских вулканитов юго-восточной части Горного Алтая (аксайский комплекс) // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (8), с. 1129—1151, doi: 10.15372/GiG20180801.

Куйбида М.Л., Крук Н.Н., Шокальский С.П., Гусев Н.И., Мурзин О.В. Надсубдукционные плагиограниты Рудного Алтая: возраст и особенности состава // ДАН, 2015, т. 464, № 3, с. 317—322, doi: 10.7868/S0869565215270171.

Лавренчук А.В., Изох А.Э., Поляков Г.В., Метелкин Д.В., Михальцов Н.Э., Травин А.В. Черносопкинский тешенит-сиенитовый комплекс северо-западной части Восточного Саяна — одно из проявлений раннедевонского плюмового магматизма // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (6), с. 663—677.

Лучицкий И.В. Вулканизм и тектоника девонских впадин Минусинского межгорного прогиба. М., Изд-во АН СССР, 1960, 276 с.

Макаренко Н.А., Кортусов М.П. Петрология габбро-сиенит-нефелин-сиенитовой ассоциации Марининской тайги. Томск, Изд-во Том. ун-та, 1991, 310 с.

Мартынов Ю.А. Геохимия базальтов активных континентальных окраин и зрелых островных дуг (на примере Северо-Западной Пацифики). Владивосток, Изд-во Дальнаука, 1999, 218 с.

Метелкин Д.В. Кинематическая реконструкция раннекаледонской аккреции на юго-западе Сибирского палеоконтинента по результатам анализа палеомагнитных данных // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (4), с. 500—522.

Ножкин А.Д., Смагин А.Н. Опыт расчленения и корреляции девонских вулканогенных образований северо-западной части Агульской впадины по радиогеохимическим данным // Магматические комплексы Восточной Сибири. Новосибирск, ИГиГ АН СССР, 1979, с. 72—95.

Перфилова О.Ю., Михайленко В.В., Коптев И.И., Сидорас С.Д. Кошкулакский эталон ордовикской вулканоплутонической ассоциации (Кузнецкий Алатау). Красноярск, Изд-во КНИИГиМС, 1999, 159 с.

Перфилова О.Ю., Махлаев М.Л., Сидорас С.Д., Ордовикская вулканоплутоническая ассоциация в структурах горного обрамления Минусинских впадин // Литосфера, 2004, № 3, с. 137—152.

Ротарш И.А., Самыгин С.Г., Гредюшко Е.А., Кейльман Г.А., Милеев В.С., Перфильев А.С. Девонская активная континентальная окраина на Юго-Западном Алтае // Геотектоника, 1982, т. 16, с. 44—59.

Рублев А.Г., Шергина Ю.П., Берзон Е.И. Изотопный возраст палеозойских вулканитов Красноярского поднятия и проблема стратиграфии быскарской серии // Отечественная геология, 1999, № 3, с. 47—54.

Руднев С.Н. Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области и Озерной зоны Западной Монголии. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2013, 299 с.

Сенников Н.В., Грацианова Р.Т., Соболев Е.С., Клец Т.В. О генезисе и возрасте арамчакской свиты нижнего девона Северо-Минусинской впадины // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (3), с. 15—24.

Сугоракова А.М., Никифоров А.В. Базитовый магматизм раннедевонского рифтогенного Тувинского прогиба // Геосферные исследования, 2016, № 1, с. 85—103, doi: 10.17223/25421379/1/7.

Тикунюв Ю.В. Геохимия девонского базальт-андезитового вулканизма западной части Горного Алтая // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (2), с. 61—69.

Уваров А.Н., Уварова Н.М. Петротип горячегорского щелочно-габброидного комплекса (Кузнецкий Алатау). Новосибирск, Изд-во СНИИГГиМС, 2008, 191 с.

Уваров А.Н., Уварова Н.М. Петротип соколиногорского трахибазальт-эпилейцит-фонолитового комплекса. Новосибирск, Изд-во СНИИГГиМС, 2009, 108 с.

Шнейдер Е.А., Зубкус Б.П. Стратиграфия нижне- и среднедевонских отложений Северо-Минусинской и Сыдо-Ербинской впадин // Материалы по геологии Красноярского края. Красноярск, Изд-во ТГУ, 1962, № 3, с. 41—56.

Шокальский С.П., Бабин Г.А., Владимиров А.Г., Борисов С.М. Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000, 187 с.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И. Рифтогенный магматизм активных континентальных окраин и его рудоносность. М., Наука, 1991, 263 с.

Ярмолюк В.В., Воронцов А.А. Девонский вулканизм восточного обрамления Монгольского Алтая и его структурная приуроченность // Геотектоника, 1993, № 4, с. 76—86.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И. Глубинная геодинамика, мантийные плюмы и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // Петрология, 2003, т. 11, № 6, с. 556—586.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. Северо-Азиатский суперплюм в фанерозе: магматизм и глубинная геодинамика // Геотектоника, 2000, № 5, с. 3—29.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Ковач В.П., Рыцк Е.Ю., Козаков И.К., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. Ранние стадии формирования Палеоазиатского океана: результаты геохронологических, изотопных и геохимических исследований позднерифейских и венд-кембрийских комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса // ДАН, 2006, т. 410, № 5, с. 657—663.

Ярмолюк В.В., Ковач В.П., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Козловский А.М., Котов А.Б., Яковлева С.З., Федосеенко А.М. Состав, источники и механизмы формирования континентальной коры Озерной зоны каледонид Центральной Азии: I. Геологические и геохронологические данные // Петрология, 2011а, № 1, с. 56—79.

Ярмолюк В.В., Кудряшова Е.А., Козловский А.М., Саватенков В.М. Позднекайнозойская вулканическая провинция Центральной и Восточной Азии // Петрология, 2011б, т. 19, № 4, с. 341—362.

Ярмолюк В.В., Кузьмин М.И., Воронцов А.А. Конвергентные границы западно-тихоокеанского типа и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (12), с. 1831—1850.

Arndt N.T., Czamanske G.K., Wooden J.L., Fedorenko V.A. Mantle and crustal contributions to continental flood volcanism // Tectonophysics, 1993, v. 223, p. 39—52, doi: 10.1016/0040-1951(93)90156-E.

Atlas of geological maps of Central Asia and adjacent areas, 1: 2,500,000 / Ed. T. Li. Beijing, Geological Publ. House, 2008, 8 sheets.

Ayalew D., Gibson S.A. Head-to-tail transition of the mantle: Geochemical evidence from a Miocene bimodal basalt–rhyolite succession in the Ethiopian Large Igneous Province // Lithos, 2009, v. 112, p. 461—476, doi: 10.1016/j.lithos.2009.04.005.

Carlson R.W. Physical and chemical evidence on the cause and source characteristics of flood basalt volcanism // Aust. J. Earth Sci., 1991, v. 38, p. 525—544.

Chen H., Xia Q.-K., Ingrin J., Deloule E., Bi Y. Heterogeneous source components of intraplate basalts from NE China induced by the ongoing Pacific slab subduction // Earth Planet. Sci. Lett., 2017, v. 459, p. 208—220, doi: 10.1016/j.epsl.2016.11.030.

Cui X., Sun M., Zhao G., Yao J., Zhang Y., Han Y., Dai L. A Devonian arc–back-arc basin system in the southern Chinese Altai: Constraints from geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic data for meta-basaltic rocks // Lithos, 2020, v. 366—367, p. 1—14, doi: 10.1016/j.lithos.2020.105540.

Ernst R.E. Large Igneous Provinces. Cambridge, Cambridge Univ. Press., 2014, 653 p., doi: 10.1017/CBO9781139025300.

Ewart A., Marsh J.S., Milner S.C., Duncan A.R., Kamber B.S., Armstrong R.A. Petrology and geochemistry of Early Cretaceous bimodal continental flood volcanism of the NW Etendeka, Namibia: Part 2. Characteristics and petrogenesis of the high-Ti latite and high-Ti and low-Ti voluminous quartz latite eruptives // J. Petrol., 2004, v. 45, p. 107—138, doi: 10.1093/petrology/egg082.

Fedoseev G.S. The role of mafic magmatism in age specification of Devonian continental trough deposits: evidence from the Minusa Basin, western Siberia, Russia // Bull. Geosci., 2008, v. 83 (4), p. 473—480, doi: 10.3140/bull.geosci.2008.04.473.

Hawkesworth C.J., Gallagher K., Kirstein L., Mantovani M.S.M., Peate D.W., Turner S.P. Tectonic controls on magmatism associated with continental break-up: an example from the Paraná–Etendeka Province // Earth Planet. Sci. Lett., 2000, v. 179 (2), p. 335—349.

Hoang N., Uto K. Geochemistry of Cenozoic basalts in the Fukuoka district (northern Kyushu, Japan): implications for asthenosphere and lithospheric mantle interaction // Chem. Geol., 2003, v. 198 (3—4), p. 249—268, doi: 10.1016/S0009-2541(03)00031-7.

Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust // Treatise on geochemistry. Amsterdam, Elsevier, 2003, p. 594—649, doi: 10.1016/B0-08-043751-6/03035-8.

Kröner A., Kovach V., Belousova E., Hegner E., Armstrong R., Dolgoplova A., Seltmann R., Alexeiev D.V., Hoffmann J.E., Wong J., Sun M., Cai K., Wang T., Tong Y., Wilde S.A., Degtyarev K.E., Rytsk E. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt // Gondwana Res., 2014, v. 25, p. 103—125, doi: 10.1016/j.gr.2012.12.023.

Kuibida M.L., Murzin O.V., Kruk N.N., Safonova I.Y., Sun M., Komiya T., Wong J., Aoki S., Murzina N.M., Nikolaeva I., Semenova D.V., Khlestov M., Shelepaev R.A., Kotler P.D., Yakovlev V.A., Naryzhnova A.V. Whole-rock geochemistry and U-Pb ages of Devonian bimodal-type rhyolites from the Rudny Altai, Russia: Petrogenesis and tectonic settings // Gondwana Res., 2020, v. 81, p. 312—338, doi: 10.1016/j.gr.2019.12.002.

Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // Earth Sci. Rev., 2010, v. 102, p. 29—59, doi: 10.1016/j.earscirev.2010.06.004.

Liu Y., Li W., Feng Z., Wen Q., Neubauer F., Liang C. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt // *Gondwana Res.*, 2017, v. 43, p. 123—148, doi: 10.1016/j.gr.2016.03.013.

Malkovets V.G., Litasov Yu.D., Travin A.V., Litasov K.D., Taylor L.A. Volcanic pipes as clues to upper mantle petrogenesis: Mesozoic Ar-Ar dating of the Minusinsk basalts, South Siberia // *Int. Geol. Rev.*, 2003, v. 45 (2), p. 133—142, doi: 10.2747/0020-6814.45.2.133.

Mustafaev A.A., Gertner I.F., Ernst R.E., Serov P.A., Kolmakov Yu.V. The Paleozoic-aged university foidolite-gabbro pluton of the northeastern part of the Kuznetsk Alatau ridge, Siberia: geochemical characterization, geochronology, petrography and geophysical indication of potential high-grade nepheline ore // *Minerals*, 2020, v. 10 (12), 1128, doi: 10.3390/min10121128.

Parfenov L.M., Khanchuk A.I., Badarch G., Miller R.J., Naumova V.V., Nokleberg W.J., Ogasawara M., Prokopyev A.V., Yan H., Belichenko V., Berzin N.A., Bulgatov A.N., Byamba J., Deikunenko A.V., Dong Y., Dril S.I., Gordienko I.V., Hwang D.H., Kim B.I., Korago E.A., Kos'ko M.K., Kuzmin M.I., Orolmaa D., Oxman V.S., Popeko L.I., Rudnev S.N., Sklyarov E.V., Smelov A.P., Sudo S., Suprunenko O.I., Sun F., Sun J., Sun W., Timofeev V.F., Tret'yakov F.F., Tomurtogoo O., Vernikovskiy V.A., Vladimirov A.G., Wakita K., Ye M., Zedgenizov A.N. Preliminary Northeast Asia geodynamics map. Scale 1:5 000 000. USGS Open-File Rep. 2003-205, 2003, doi: 10.3133/ofr03205.

Pearce J.A., Ernst R.E., Peate D.W., Rogers C. LIP printing: Use of immobile element proxies to characterize Large Igneous Provinces in the geologic record // *Lithos*, 2021, v. 392—393, 106068, doi: 10.1016/j.lithos.2021.106068.

Pirajno F. Intracontinental strike-slip faults, associated magmatism, mineral systems and mantle dynamics: examples from NW China and Altai-Sayan (Siberia) // *J. Geodyn.*, 2010, v. 50 (3—4), p. 325—346, doi: 10.1016/j.jog.2010.01.018.

Puffer J.H. Contrasting high field strength element contents of continental flood basalts from plume versus reactivated-arc sources // *Geology*, 2001, v. 29, p. 675—678, doi: 10.1130/0091-7613(2001)029<0675:CHFSE C>2.0.CO;2.

Safonova I.Yu., Santosh M. Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: Tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes // *Gondwana Res.*, 2014, v. 25 (1), p. 126—158, doi: 10.1016/j.gr.2012.10.008.

Sakuyama T., Tian W., Kimura J.-I., Fukao Y., Hirahara Y., Takahashi T., Senda R., Chang Q., Miyazaki T., Obayashi M., Kawabata H., Tatsumi Y. Melting of dehydrated oceanic crust from the stagnant slab and of the hydrated mantle transition zone: constraints from Cenozoic alkaline basalts in eastern China // *Chem. Geol.*, 2013, v. 359 (14), p. 32—48, doi: 10.1016/j.jhemgeo.2013.09.012.

Sun S.S., McDonough W.F. Magmatism in the ocean basins // *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1989, v. 42, p. 313—345.

Tatsumi Y., Eggin S.M. Subduction zone magmatism. Oxford, Blackwell, 1995, 211 p.

Vorontsov A., Yarmolyuk V., Dril S., Ernst R., Perfilova O., Grinev O., Komaritsyna T. Magmatism of the Devonian Altai-Sayan Rift System: Geological and geochemical evidence for diverse plume-lithosphere interactions // *Gondwana Res.*, 2021, v. 89, p. 193—219, doi: 10.1016/j.gr.2020.09.007.

Wang Y., Zhao Z.F., Zheng Y.F., Zhang J.J. Geochemical constraints on the nature of mantle source for Cenozoic continental basalts in east-central China // *Lithos*, 2011, v. 125 (3—4), p. 940—955, doi: 10.1016/j.lithos.2011.05.007.

Windley B.F., Alexeiev D.V., Xiao W., Kröner A., Badarch G. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt // *J. Geol. Soc. London*, 2007, v. 164, p. 31—47.

Xu Y.-G., He B., Chung S.-L., Menzies M.A., Frey F.A. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province // *Geology*, 2004, v. 32 (10), p. 917—920, doi: 10.1130/G20602.1.

Yarmolyuk V.V., Kudryashova E.A., Kozlovskiy A.M., Lebedev V.A., Savatenkov V.M. Late Mesozoic–Cenozoic intraplate magmatism in Central Asia and its relation with mantle diapirism: Evidence from the South Khangai volcanic region, Mongolia // *J. Asian Earth Sci.*, 2015, v. 111 (1), p. 604—623, doi: 10.1016/j.jseas.2015.05.008.

Zhao G., Wang Y., Huang B., Dong Y., Li S., Zhang G., Yu S. Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea // *Earth Sci. Rev.*, 2018, v. 186 (2), p. 262—286, doi: 10.1016/j.earscirev.2018.10.003.